文章编号:1000-4939(2023)06-1364-10

基于有限差分的高填减载明洞土拱形态与结构响应的时效性研究

刘学魁[1],李盛[1],王长丹[2]

(1. 兰州交通大学土木工程学院,730070 兰州;
2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,201804 上海)

摘 要:回填场地是短期内重构形成的,与自然场地相比,回填材料等因素对其结构内力影响显著。为了保证高填减载明洞在使用过程中的长期安全性,需要对其进行时效性研究。基于有限差分软件 FLAC^{3D},建立高填减载明洞模型,分析施工完成后,上方土体内部土拱形态发展和结构响应时效性。结果表明:当上方回填土体后期蠕变性能明显时,随着时间流逝,土体内部的土拱会逐渐退化至消失,结构响应也会发生较大变动,而且前期的变化速率较大,中期会逐渐变小,后期将变为零;回填高度和回填材料对高填减载明洞各方面的时效性有较大影响,增加回填高度,土拱形态和结构响应有显著变化,但回填高度的改变并不会影响两者随时间的整体变化趋势;若材料的蠕变性能较弱,随着时间推移,土拱形态会更加明显,而结构响应变化较小。该研究成果可对该类结构的设计及工后安全监测提供参考。

关键词:高填减载明洞;数值模拟;土拱形态;结构响应;时效性

中图分类号:U458.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.06.017

Study on the timeliness of soil arch and structural response of the unloading high-filled cut-and-cover tunnels based on finite difference method

LIU Xuekui[1], LI Sheng[1], WANG Changdan[2]

(1. Civil Engineering College, Lanzhou Jiaotong University, 730070 Lanzhou, China;
2. Key Laboratory of Road & Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804 Shanghai, China)

Abstract: The backfill site is formed by short-term reconstruction. Compared with the natural site, factors such as backfill material significantly affect the internal force of the structure. In order to investigate the long-term safety of unloading high-filled cut-and-cover tunnels (HFCCT) during use process, the timeliness of the structural response needs to be analyzed. The authors established the model of HFCCT

收稿日期:2022-04-13 **修回日期**:2022-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51668036;51868041);甘肃省基础研究创新群体项目(No. 21JR7RA347)

通信作者:李盛,教授。E-mail:ligwin@126.com

引用格式:刘学魁,李盛,王长丹. 基于有限差分的高填减载明洞土拱形态与结构响应的时效性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1364-1373.
LIU Xuekui, LI Sheng, WANG Changdan. Study on the timeliness of soil arch and structural response of the unloading high-filled cut-and-cover tunnels based on finite difference method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(6):1364-1373.

with the finite different software ($FLAC^{3D}$) to analyze the variation of the soil arch shape and the structural response of HFCCT over time after its completion. The results show that when the creeping materials are filled, the soil arch inside the backfill soil gradually degenerates and disappears and the various aspects of the structure response change greatly. Besides, the rate of change is higher in the early stage, gradually declines in the middle stage, and finally basically stabilizes and becomes zero. The backfill height and backfill material have certain influence on soil arch shape and structural response. With the increase of backfill height, the shape of soil arch and the structure response will change obviously, but the changing height does not affect the overall change trend over time. If the creep properties of materials are weak, the shape of soil arch changes notably, but the structural response varies little as time goes by. The research results can provide reference for the design and safety monitoring of such structures.

Key words: high-filled cut-and-cover tunnel; numerical simulation; shape of soil arch; structural response; timeliness

随着基础建设的快速发展,西部地区的建设脚步已经远远超过了以往。面对西部黄土高原独有的沟壑区域,整个交通建设过程中需要修建大量的隧道,同时要兼顾到城市土地资源稀缺问题,高填减载明洞随之产生。减载措施使得高填明洞上方土体产生土拱效应,从而减小结构受力,然而,由于回填土体的长期蠕变性能,使得土拱具有一定的时效性,且结构受力长期处于动态变化中。因而,明洞上方回填土体内部土拱形态演化以及明洞结构的力学响应对于结构的长期安全就显得尤为重要。

目前,高填明洞的研究较少,其理论基础主要来源于一些高填方涵洞。1950 年,SPANGLER[1] 基于对结构与其上方土体的平衡关系,提出了土压力减载,得出竖向土压力的计算理论;MCGUIGAN 等[2-5] 在涵洞结构上方设置压缩区域,结构的上土压力显著减小,并得到相应的计算公式,而且也保障了结构的安全。对明洞而言,李盛等[6-9] 在明洞上方铺设一些高压缩材料,有较为明显的减载作用,并得到材料变形与填土沉降的关系。通过对一些地下结构进行减载布置过程中,发现回填土体内部出现土拱效应;泰沙基的活动门试验证明了土拱效应,回填土体内部存在沉降差,然后导致土压力产生重分布现象,对下方结构有明显的减载效应;翁效林等[10] 通过离心模型试验对结构上方回填土体内部土拱进行了研究,发现回填高度对土拱和结构本身的影响。

西北地区黄土分布较广,回填过程中往往就地取材,然而黄土作为一种离散体,具有不稳定性,随着时间发生蠕变,进而对整个高填减载体系产生影响。许多学者通过试验和有限元的方法均证明了黄土的蠕变性能,并发现重塑黄土蠕变更加明显[11-13]。葛苗苗等[14] 发现蠕变是高填方黄土工后沉降的重要原因之一,而且有一定时效性;贾聂宇驰等[15] 通过对高填明洞结构研究发现,回填黄土蠕变改变了明洞顶部土压力分布规律,对结构受力产生一定影响。然而,对高填减载明洞完工后时效性的研究较少,结构上方回填土体的蠕变对整个体系有较大影响。分析蠕变过程中土拱形态发展和结构响应时效性,对结构在使用过程中的安全性具有重要意义。因此,本研究采用有限差分软件建立高填减载明洞模型,模拟回填完成后的土体蠕变过程,分析回填土体内部土拱形态和明洞结构内力随着时间的变化,对高填减载明洞及相似结构的安全使用起到一定的指导作用。

1 数值模拟

1.1 数值模拟工况

为探究高填减载明洞完工后,上方土体蠕变对土拱形态和结构响应的影响。本研究拟采用 $FLAC^{3D}$ 建立高填明洞结构。杨锡武等[16] 对高填涵洞长期性能的试验分析,可知回填高度和回填材料影响土拱形态及结构响应。在分析过程中,采用正交实验法建模,为排除其他因素影响,保证边坡角度、槽宽、混凝土平台等保持不变,仅改变回填高度和回填材料。本研究中的减载方案为减载黄土 + 混凝土柱平台,选择 3 种回填高度:40、50、60 m,2 种回填材料:重塑回填黄土[17] 和砂砾石[18],共设置以下 6 种工况 C1 ~ C3、S1 ~ S3,详见表 1。

表 1 工况分类

Tab. 1 Classification of working conditions

回填材料	回填高度/m		
	40	50	60
重塑回填黄土	C1	C2	C3
砂砾石	S1	S2	S3

参考贾聂宇驰等[15-17]、LI 等[19]对于高填减载明洞的研究成果,模型中采用不同本构模型来反映各个部位力学性能;衬砌结构和两侧边坡采用线弹性模型,地基和回填砂砾石均采用 Mohr-Coulomb 模型,材料参数的取值见表 2。

表 2 计算模型参数

Tab. 2 Parameters of calculation models

本构模型	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m^{-3})
衬砌结构	3×10^4	0.167	–	–	24
两侧边坡	4×10^3	0.2	–	–	20
地基	50	0.25	78	32	22
回填砂砾石	150	0.3	0	47	16

数值模拟过程中采用两种黄土,赋予 Burgers 本构模型。Burgers 本构由 Maxwell 体和 Kelvin 体通过串联的方式组成,验证了 Burgers 模型能较好地描述重塑压实黄土蠕变行为[17],蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M}t + \frac{\sigma_0}{E_K}\left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}t}\right) \tag{1}$$

模拟过程中选择压实度为 96% 的高压实重塑黄土作为回填材料,压实度为 85% 的低压实重塑黄土作为减载材料,根据张豫川等[20]对黄土的研究,获得减载黄土和回填黄土的 Burgers 模型参数如表 3 ~4 所示。

表 3 减载黄土 Burgers 模型参数

Tab. 3 Parameters of Burgers model for load shedding loess

σ_0/kPa	E_M/MPa	E_K/MPa	η_M/(MPa·h)	η_K/(MPa·h)
100	80.7	12.44	2 843.78	234.98
200	102.8	13.09	4 551.93	24.75
400	87.91	11.42	7 639.23	32.78
800	78.05	11.56	20 771.3	10.33
1 200	99.37	11.79	30 498.9	38.78
1 600	137.12	14.01	37 779.3	16.65

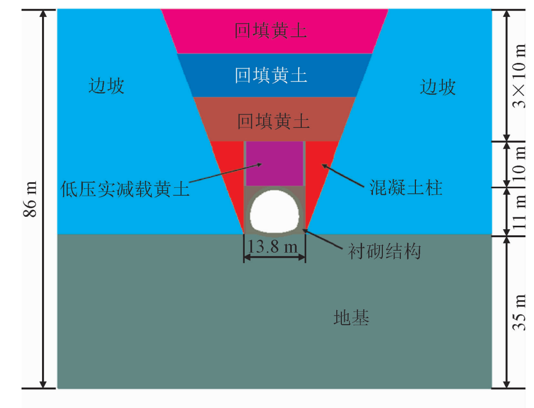
表 4 回填黄土 Burgers 模型参数

Tab. 4 Parameters of Burgers model for back fill loess

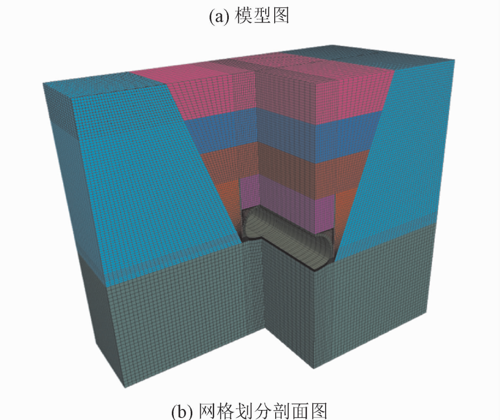
σ_0/kPa	E_M/MPa	E_K/MPa	η_M/(MPa·h)	η_K/(MPa·h)
100	18.6	286.87	2 221.09	686.37
200	26.62	122.25	4 079.17	70.57
400	19.6	58.73	6 297.69	23.61
800	17.79	117.8	18 399	32.6
1 200	14.98	122.08	31 180.3	86.51
1 600	21.32	207.79	48 099.4	317.064

1.2 建模建立及测点布置

本研究采用 FLAC^{3D}有限差分软件,建立模型如图 1 所示。以 C1 工况为例,地基厚度为 35 m,沟槽底部宽度为 13.8 m,明洞高度 11 m,宽度 12.8 m。模拟施工过程先在洞顶正上方 12.8 m 的范围内铺设 10 m 高的减载黄土,与混凝土柱顶部齐平,然后再沟槽内每 10 m 高度进行一次回填黄土的布置,最终填高至 40 m。为提高土拱形态和结构响应的精度,对明洞上方回填区域和衬砌结构的网格进行加密处理。



(a) 模型图



(b) 网格划分剖面图

图 1 数值计算模型建立

Fig. 1 Establishment of numerical calculation model

为了研究高填减载明洞土拱形态发展,明洞上方回填土体内部布置大量监测点,同时为了对衬砌结构力学特性的时效性进行描述,衬砌结构上也布置测点。如图 2 所示,在上方土体的竖向截面内沿某一条直线布置测点来检测不同深度的土压力,如 *A-A* 截面上的 $A_1 \sim A_i$,*N-N* 截面上的 $N_1 \sim N_i$等,以此为依据描绘土拱形态;衬砌结构上选择拱顶、拱肩、拱腰及拱脚布置测点,用以监测结构响应(弯矩比和轴力比)随时间的变化规律。

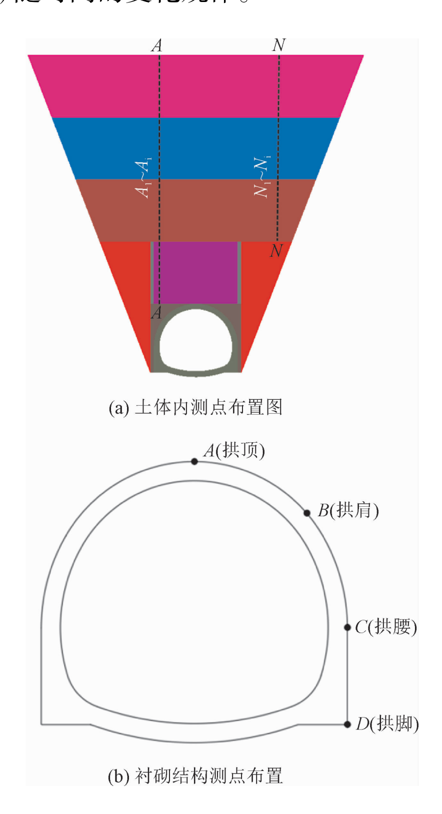


图 2　测点布置

Fig. 2　Layout of measuring points

为了研究高填减载明洞土拱形态和结构响应的时效性,对其整个结构加上时间作用。黄土蠕变过程一般分为 3 个阶段[17],前期过程中所土体所发生的应变速率较快;中期虽然应变也会增大,但速率较小;后期土体蠕变达到终止点,应变不再变化。由于黄土在整个蠕变过程中,前期变化幅度较为明显,对土拱形态及结构响应影响较大,因此,前期以 30 d 为检测周期,后期每隔 360 d 选择一个时间节点,例如 0、30、60…360、720…8 280 d,研究高填减载明洞共计约 23 年内土拱形态和结构响应的时效性。

2　土拱形态与结构响应分析

通过对上述模型进行计算,获取不同工况下各方面的数据,然后逐个进行对比分析。主要研究在长期时间作用的过程中,明洞上方回填土体内土拱形态演化,衬砌结构多个位置处弯矩比和轴力比的变化。

2.1　土拱形态

混凝土柱及衬砌结构的刚度远远超过明洞上方土体,对土体有向上的支撑作用,两侧边坡对土体提供横向约束。减载黄土具有压缩性质,在回填完工后,结构上方内外土柱之间存在相对沉降。取明洞结构上方土拱的微元体,其处于平衡状态,受力示意如图 3 所示,其接触面上出现向上的切应力 τ'_θ 及正应力 σ'_θ ,在竖向平面内达到平衡状态,可得其 σ_r 的值小于 σ_R ,即为回填土体内部所产生的土拱效应[21]。形成的土拱对土体内的应力具有重分布作用,一定程度上改变了明洞结构上所受到的竖向土压力,表现在宏观结构上是传递到结构上的力也会有一定效果的减小,具有减载作用。

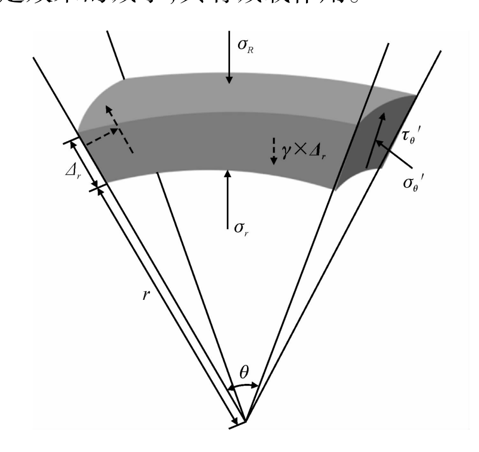


图 3　平衡的土拱微元体

Fig. 3　Soilarch form balanced microelement

参考杨涛等[22]描述土拱形态的方法,在回填土体内部设置多个竖向截面及测点,根据这些点的竖向应力绘制沿截面深度的土压力变化曲线,并与回填土体自重土压力线进行对比分析,得出土拱形态。取洞顶处竖向截面的回填土压力为例进行说明,如图 4 所示。可以看出,竖向土压力曲线 L_1 与自重土压力 L_2 在 H_b 深度处存在切点 P_1,即 H_b 深度上下方土压力发生突变,认定 P_1 点是土拱上拱线的一点;而竖向土压力曲线在 H_a 深度处存在最大值点 Q_1 点,

H_a 深度处土压力最大,认定 Q_1 点是土拱下拱线的一点。同样通过多个竖向截面上的土压力对比结果,获得 $P_1,\cdots,P_i$ 和 $Q_1,\cdots,Q_i$,构成得由上、下拱线,与周围边坡、混凝土柱围护起来的曲线形态,即为土拱形态。为了对土拱效应的变化进行量化,定义土拱形态上下拱线之间的高度为土拱厚度为 H_1,结构拱顶到下拱线顶高度为土拱高度 H_2。若回填总高度为 H,则土拱的厚度与高度分别为 $H_1 = H - H_a$,$H_2 = H_a - H_b$。

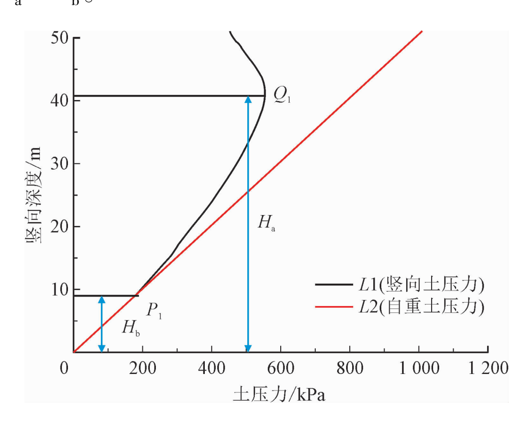
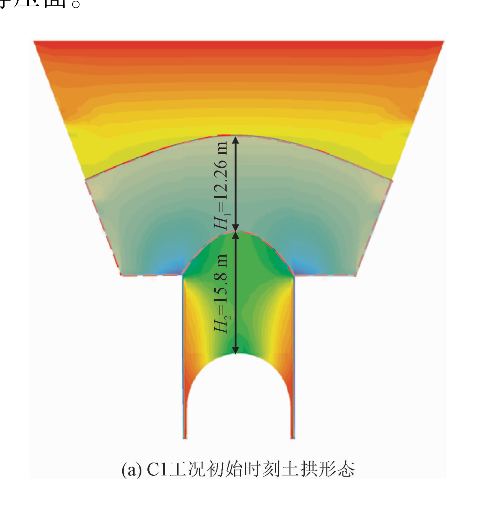


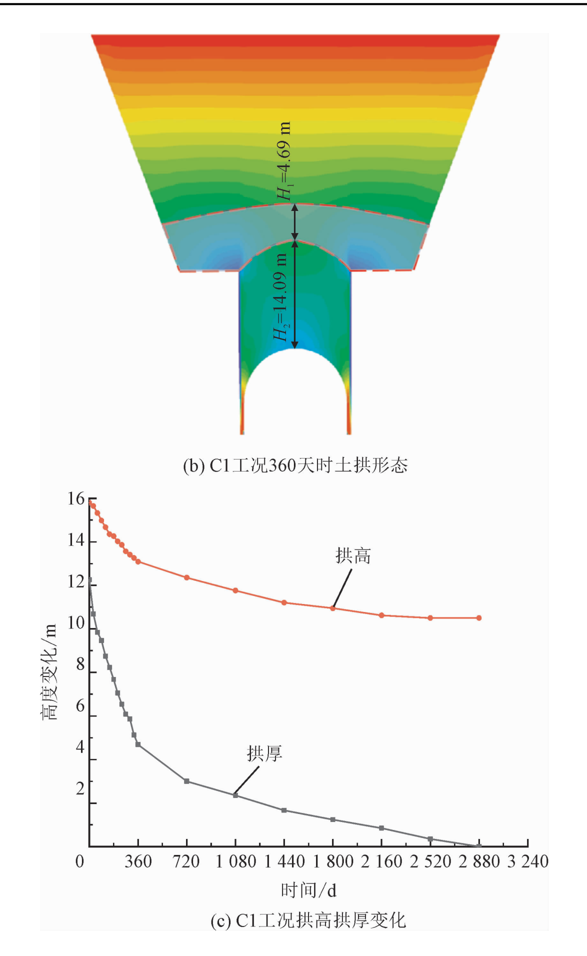
图 4 土拱形态坐标确定

Fig. 4 Determination of shape coordinates of soil arch

图 5 中显示 C1 工况下结构完工后初始时刻和 360 d 的土拱形态。由于该结构体系是静载条件下的土拱,在边坡、混凝土柱以及结构自身的作用下,形成的土拱呈对称形态;上、下拱线均为开口向下的曲线,混凝土柱的刚度较大,形成土拱的拱脚均位于混凝土柱顶部,土拱中央较薄,向两侧厚度越来越大,最后两侧搭在边坡上。上方土体蠕变过程中,土拱逐渐退化,表现为土拱形态的上、下拱线也变得平缓,拱高和拱厚越来越小,其上方的土体内逐渐形成一些等压面。



(a) C1工况初始时刻土拱形态



(b) C1工况360天时土拱形态

(c) C1工况拱高拱厚变化

图 5 C1 工况土拱形态演化

Fig. 5 Morphological evolution of soil arch under C1 condition

土拱高度和厚度变化如图 5(c)所示,拱厚 H_1 由初始时间的 12.26 m,再到 360 天时的 4.69 m,最终拱厚变为 0;拱高则从 15.43 m 到 360 天时的 14.09 m,最后消失。土拱高度和厚度前期变化速率较快,然后逐渐变慢,在经过一段时间后消失,可以看出,土拱形态演变和土体蠕变的规律基本一致。

2.2 结构各部位的应力比

回填土体内部土拱并非稳定,在土体蠕变过程中会发生演变,进而会影响到结构响应。为了反映土体蠕变对结构响应产生的影响,拟准备用衬砌结构的弯矩比和轴力比做定量描述。设定衬砌结构的弯矩比与轴力比表示为

$$\omega_{Mi} = M/M_0 \tag{2}$$

$$\omega_{Ni} = N/N_0 \tag{3}$$

式中:ω_{Mi} 为结构的弯矩比;ω_{Ni} 为结构的轴力比;M_0 为初始时刻的弯矩;N_0 为初始时刻的轴力;M 为整个变化过程中某个时间点受到的弯矩;N 为轴力。

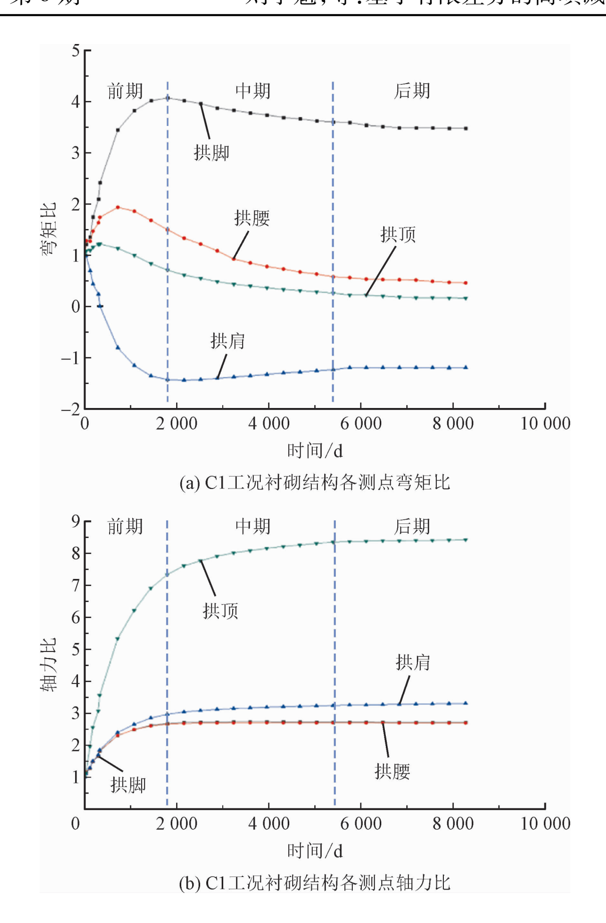


图 6　C1 工况各测点结构响应

Fig. 6　Structural response of each measuring point under C1 working condition

为更加形象地描述位置响应的时效性,统计结构拱顶、拱肩、拱腰、拱脚 4 个位置的弯矩和轴力,获得 C1 工况下的弯矩比和轴力比与时间的关系曲线,如图 6 所示。由图 6(a)可知,拱顶、拱腰及拱脚这 3 个位置,弯矩比首先增加至最大值,然后逐渐减小,这与文献[15,17]中关于蠕变对明洞顶土压力影响规律描述一致。主要是由于随着时间推移,结构上方土体不断沉降变形,蠕变过程中土拱退化,应力重新分布趋于均匀,明洞顶部土压力随着时间不断增大,对结构的作用力会变大并最终稳定。由于拱肩位置处于结构的拉压区交界处,弯矩比会减小至反号,达到最大值后逐渐减小至稳定。与弯矩比相比而言,各个位置处轴力比逐渐增大,最后达到一个稳定值,但是其变化较为剧烈,如图 6(b)所示。从图 6 中也可发现,衬砌结构不同位置处弯矩比和轴力比的变化速率与上方回填黄土蠕变一致,根据变化速率可以分为 3 个阶段。弯矩比与轴力比的变化表明,该位置内力随着时间会发生变化,若绝对值大于 1,在施工过程中应进行局部加强,并在使用过程中对其重点监测。

3　影响因素分析

根据第 2 节中设定的工况,研究回填材料和回填高度对整个结构体系的土拱形态演化和结构响应的影响。对第 2 节中确定的 C1 ~ C3、S1 ~ S3 不同工况进行模拟计算,获得各自土拱形态和结构响应的变化,分析上述两种因素的影响。

3.1　回填高度

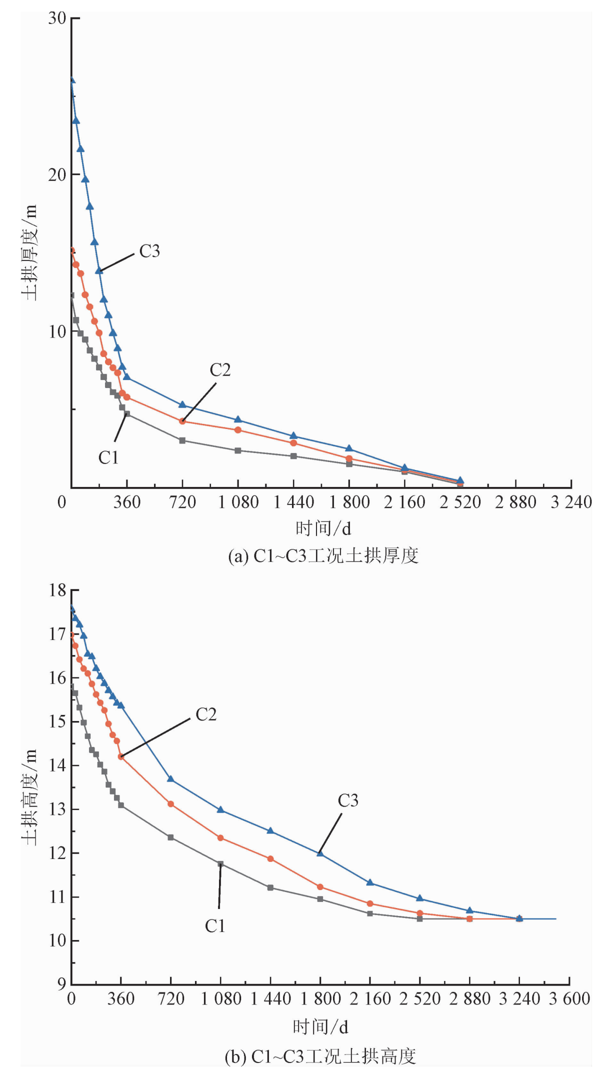
取 C1、C2、C3 工况为例,研究回填高度改变的条件下,蠕变土体内部土拱形态与衬砌结构的弯矩比和轴力比的影响,并对不同回填高度的土拱形态和结构响应进行对比分析。

1)土拱形态

对于 C1、C2、C3 这 3 种工况,不同的回填高度条件下,土体内部均出现较为明显的土拱,C2、C3 两种工况下的土拱形态和 C1 基本相同。用土拱厚度 H_1 和土拱高度 H_2 的变化来描述不同工况下上方回填土体内土拱形态的发展,并且对 3 种不同工况的结果对比分析,如图 7 所示。由图 7 可知,虽然 3 种工况的回填高度不同,但是土拱的高度和厚度都会随着时间的增加而减小,前期变化速率较大,中期变化速率逐渐减弱,直到后期土拱消失,与文中 2.1 节得到的结论一致;同一时刻的土拱形态,无论是拱高 H_1,还是拱厚 H_2 都有所差异,均和回填高度呈正相关,在一定时间范围内,回填高度越高,回填土体内部沉降差越大,土拱形态越明显。

2)结构响应

C1、C2、C3 这 3 种不同的回填高度下,对结构在拱顶、拱肩、拱腰、拱脚 4 个位置处所得到的结构响应进行分析,弯矩比和轴力比的变化趋势和回填高度为 40 m 的结果基本一致,弯矩比达到最大值后逐渐减小最后稳定,轴力比增大到某一值后稳定。对比回填高度从 40 m 到 60 m 的 3 种工况,4 个位置处弯矩比的最大值和稳定值、轴力比稳定值分别如表 5 ~ 6 所示。在整个蠕变过程中的任一时刻,各位置的弯矩比和轴力比都会出现高度越高、值越大的情况,与回填高度呈正相关。



(a) C1~C3工况土拱厚度

(b) C1~C3工况土拱高度

图 7 C1 ~ C3 工况土拱形态发展

Fig. 7 Development of soil arch under C1-C3 working conditions

表 5 C1 ~ C3 工况下的最大与最终弯矩比

Tab. 5 Maximum and ultimate moment ratio under C1-C3 conditions

位置	C1 工况		C2 工况		C3 工况	
	最大值	稳定值	最大值	稳定值	最大值	稳定值
拱顶	1.21	0.15	1.33	0.29	1.53	0.40
拱肩	-1.44	-1.20	-1.65	-1.38	-1.88	-1.57
拱腰	1.93	0.45	2.16	0.69	2.61	0.95
拱脚	4.01	3.47	4.52	3.95	5.28	4.77

表 6 C1 ~ C3 工况的最终轴力比

Tab. 6 Final axial force ratio at C1-C3 conditions

位置	C1 工况	C2 工况	C3 工况
拱顶	8.58	9.44	10.01
拱肩	3.29	3.68	4.02
拱腰	2.68	3.06	3.41
拱脚	2.69	3.08	4.77

3.2 回填材料

由上述可知,C1、C2、C3 不同的工况中,回填材料为蠕变性质较明显的材料,将回填黄土替换成为一种蠕变较差材料,选择工况 S1、S2、S3,进一步对比验证蠕变对土拱形态和结构响应的影响。当重塑回填黄土替换为砂砾石后,结构拱顶的上方,蠕变性差的砂砾石不会发生蠕变性沉降,只有小范围区域内的减载黄土会发生蠕变。

1)土拱形态

采用砂砾石作为回填材料,其 S1 土拱形态随时间的变化如图 8 所示,其中 S1 工况在初始时刻和 360 天时的土拱形态如图 8(a)、图 8(b)所示。可以看出由于压缩性质的差异,土体的沉降差会导致内部出现较为明显的应力分界面,而且在砂砾石内部出现土拱,土拱形态与回填黄土的基本相同,均为上、下拱线方向向下,中间薄,两边厚,两侧搭在边坡上,拱脚位于混凝土柱顶部。随着时间流逝,减载黄土发生蠕变,土拱演化过程和 C1 工况相反,土拱形态越来越明显,土拱高度、厚度逐渐增大,上、下拱线相对变陡,经过一段时间后,土拱形态保持不变。选择砂砾石作为回填材料,随着回填高度的变化,土拱厚度和高度变化如图 9(a)、图 9(b)所示,与 3.1 节中土拱形态随高度变化相比,不仅没有消失,而且由于回填高度增加,明洞正上方和两侧的土柱之间的沉降差增大,土拱形态更加明显,土拱效应也进一步加强。

2)结构响应

取蠕变性质较弱的砂砾石作为回填材料,对结构各个部位的弯矩比和轴力比也有影响。取 S1 工况,4 个测点位置处的弯矩比和轴力比如图 10(a)、图 10(b)所示。弯矩比和轴力比在前期变化速率均较大,经过一段时间之后,达到稳定。拱腰和拱脚由于减载黄土蠕变,结构两侧土体沉降,两侧土压力上升,弯矩比增大,拱肩和拱顶则因为土拱效应增强,结构内力降低,弯矩比减小;轴力比和 C1 工况的变化趋势相同,随着蠕变过程逐渐达到稳定,但是其增幅较小。图 11(a)、图 11(b)对各工况最终的弯矩比和轴力比进行对比,发现选择砂砾石作为回填材料,结构上各位置的两种应力比均会更加稳定,无大幅度的变化,相比于蠕变性质明显的黄土,回填砂砾

石材料,整个结构体系出现突然破坏的可能性降低。进一步发现回填高度增加,最终弯矩比和轴力比会有所降低,结构响应与回填高度呈负相关,与回填黄土工况的规律相反。

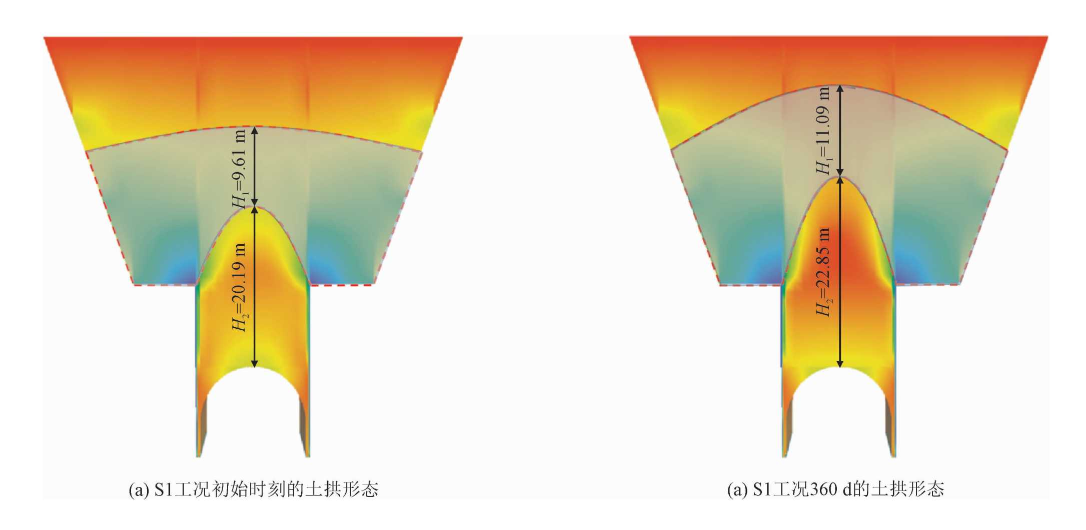


图 8　S1 工况下的土拱形态演化

Fig. 8　Morphological evolution of soil arch under S1 condition

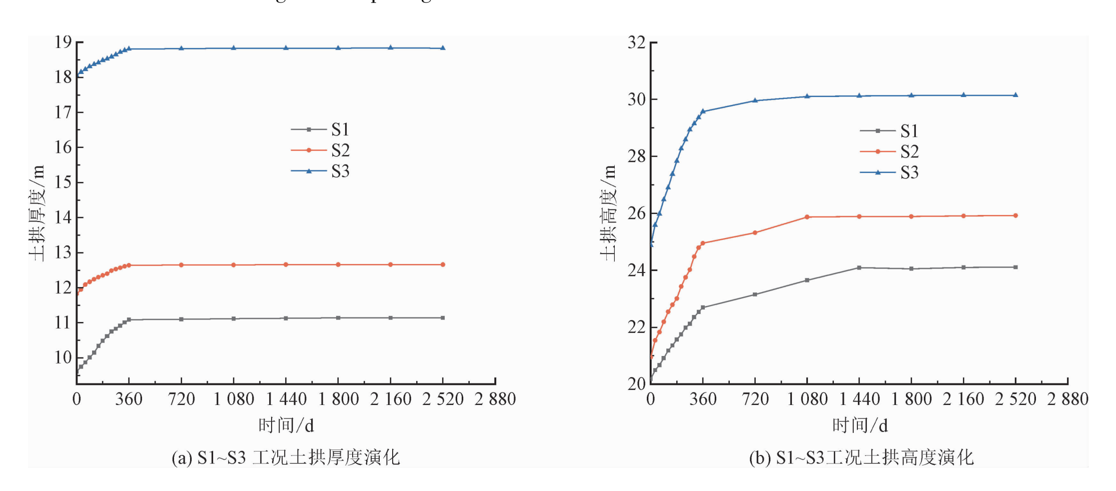


图 9　S1 ~ S3 工况下的拱高、拱厚变化

Fig. 9　Change of arch height and arch thickness under S1-S3 working conditions

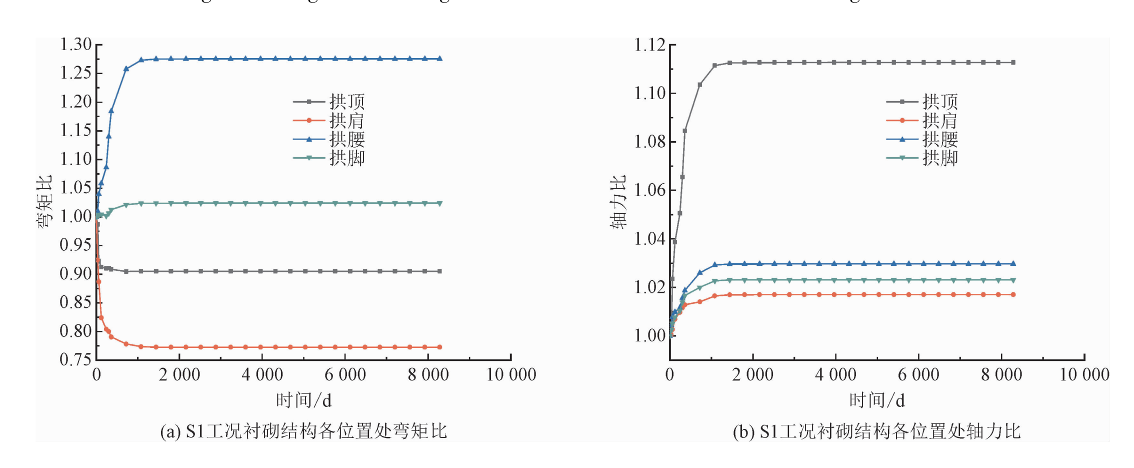
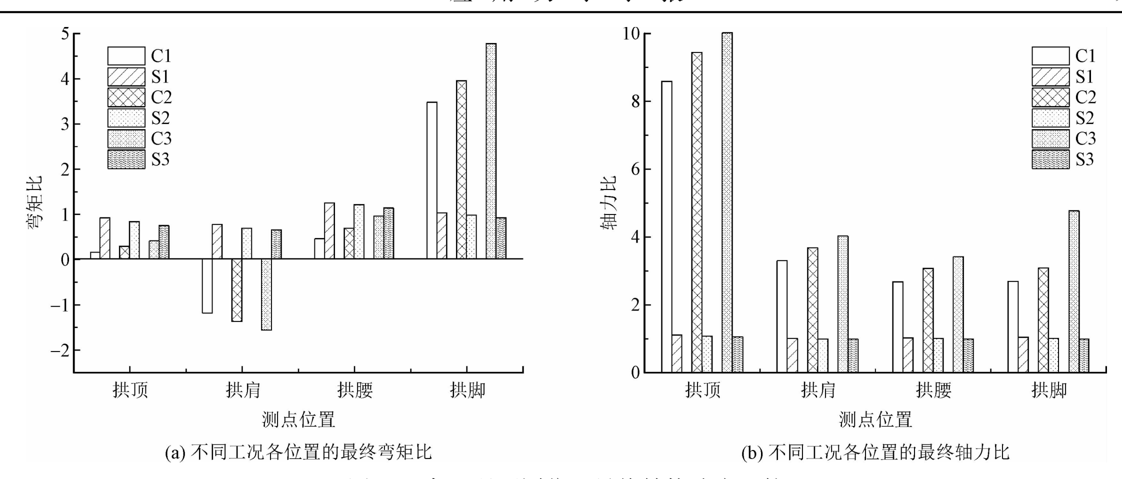


图 10　S1 工况下的拱高、拱厚变化

Fig. 10　Change of arch height and arch thickness under S1 working condition



(a) 不同工况各位置的最终弯矩比

(b) 不同工况各位置的最终轴力比

图 11 各工况不同位置最终结构响应比较

Fig. 11 Comparison of final structural responses at different locations under different working conditions

4 结 论

本研究采用 FLAC^{3D}建立有限差分模型,对高填减载明洞在工后使用过程中,结构上方土体蠕变所导致的土拱形态演变、结构响应(弯矩比和轴力比)的时效性进入深入探讨分析,并得到以下结论。

1)采用回填黄土作为回填材料,随着时间的推移过程,结构上方土体发生蠕变,土拱形态、结构的弯矩比和轴力比发生变化,前期变化较大、中期较小的趋势,后保持在较为稳定的范围内。变化过程和土体蠕变的 3 个阶段基本同步,充分说明了蠕变对土拱形态演化和结构特性时效性的影响。

2)采用砂砾石回填,土拱形态会更加明显,减载效应更强。由于减载黄土占土体份额较少,随着时间流逝,结构响应变化较小,整个过程中弯矩比和轴力比相对稳定,发生变化的幅度不大,而且更早达到稳定。因此,选择合适的回填材料对高填减载明洞的长期安全性至关重要。

3)填土高度增加,土拱厚度及高度均有所增加,然而,若填土及减载材料同时存在蠕变性能,最终土拱将会消失,减载效果消失,结构响应与回填高度呈正相关,相反,若仅减载材料存在蠕变性能,土拱效应将增强;结构响应与回填高度呈负相关。

参考文献:

[1] SPANGLER M G. A theory on loads on negative projecting conduits [C]//Proceedings of the Thirtieth Annual Meeting of the Highway Research Board Held. Washington, DC, USA: Highway Research Board, 1951: 153-161.

[2] MCGUIGAN B L, VALSANGKAR A J. Centrifuge testing and numerical analysis of box culverts installed in induced trenches[J]. Canadian geotechnical journal, 2010, 47(2): 147-163.

[3] 黄笑犬,张谢东,晓夏,等. 基于 FLAC3D 的高填方涵洞 EPS 板减荷效应研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(3): 554-559.
HUANG Xiaoquan, ZHANG Xiedong, XIAO Xia, et al. Research on load reduction effect of EPS slab for high fill culvert based on FLAC3D[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2019, 43(3): 554-559 (in Chinese).

[4] 陶庆东,何兆益,贾颖. 涵洞-填土-地基共同作用的涵洞减载效应研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 67-74.
TAO Qingdong, HE Zhaoyi, JIA Ying. Study on the load reduction effect of culvert-fill-foundation interaction[J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 2020, 42(5): 67-74 (in Chinese).

[5] HASSANKHANI T E, HALABIAN A. Experimental and using geofoam[J]. Numerical analyses of buried box culverts in geotechnical engineering, 2020, 5: 1-12.

[6] 李盛,卓彬,何川,等. EPS 板减载对宽坦式高填黄土明洞衬砌结构内力和厚度的影响分析[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 17-23.
LI Sheng, ZHUO Bin, HE Chuan, et al. Analysis on influence of load reduction of EPS board on internal force and thickness of lining structure of high fill loess open cut tunnel in wide and flat area [J]. China railway science, 2019, 40(1): 17-23 (in Chinese).

[7] 马莉,李盛,王起才,等. 沟槽式高填黄土明洞卸载模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 1065-1071.
MA Li, LI Sheng, WANG Qicai, et al. Unloading model test on open cut tunnels in high filled loess trench[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(5): 1065-1071 (in Chinese).

[8] 李盛,王起才,马莉,等. 黄土地区高填土明洞土拱效应及土压力减载计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1055-1062.
LI Sheng, WANG Qicai, MA Li, et al. Earth pressure and soil arch

effect for high fill open cut tunnel in loess area under different load reduction schemes[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2014,33(5):1055-1062(in Chinese).

[9] 姚玉相,李盛,马莉,等. 基于颗粒流的高填黄土减载明洞土拱效应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(1):139-147.
YAO Yuxiang,LI Sheng,MA Li,et al. Analysis on soil arching for unloading structure of high-filled cut-and-cover tunnel based on particle flow simulation[J]. Journal of railway science and engineering,2020,17(1):139-147(in Chinese).

[10] 翁效林,谢永利,刘保健. 高填方路堤涵洞碎散体填土成拱效应离心模型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(2):31-35.
WENG Xiaolin,XIE Yongli,LIU Baojian. Centrifugal model of arch action of granular soil fills of culverts under high Embankment[J]. Journal of Chang'an University (natural science edition),2008,28(2):31-35(in Chinese).

[11] WANG X G,WANG J D,ZHAN H B,et al. Moisture content effect on the creep behavior of loess for the catastrophic Baqiao landslide[J]. Catena,2020,187:104371.

[12] XIE X,QI S W,ZHAO F S,et al. Creep behavior and the microstructural evolution of loess-like soil from Xi'an area,China[J]. Engineering geology,2018,236:43-59.

[13] 李昂,陈建博,孙兴华,等. 原状黄土一维蠕变试验及蠕变模型[J]. 科学技术与工程,2021,21(21):8789-8796.
LI Ang,CHEN Jianbo,SUN Xinghua,et al. One dimensional creep test and creep model of undisturbed loess[J]. Science technology and engineering,2021,21(21):8789-8796(in Chinese).

[14] 葛苗苗,李宁,郑建国,等. 基于一维固结试验的压实黄土蠕变模型[J]. 岩土力学,2015,36(11):3164-3170,3306.
GE Miaomiao,LI Ning,ZHENG Jianguo,et al. A creep model for compacted loess based on 1D oedometer test[J]. Rock and soil mechanics,2015,36(11):3164-3170,3306(in Chinese).

[15] 贾聂宇驰,李盛,李智鹏,等. 基于有限差分法的高填黄土明洞土体蠕变分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(8):2046-2054.
JIA Nie yuchi,LI Sheng,LI Zhipeng,et al. Analysis on soil creeping for high-filled cut-and-cover tunnel based on finite difference method[J]. Journal of railway science and engineering,2020,17(8):2046-2054(in Chinese).

[16] 杨锡武,张永兴. 山区公路高填方涵洞的成拱效应及土压力计算理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(21):3887-3893.
YANG Xiwu,ZHANG Yongxing. Study on arch action and earth pressure theory for culverts under high embankment[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2005,24(21):3887-3893(in Chinese).

[17] 贾聂宇驰. 基于黄土蠕变的高填方明洞长期力学性能演化规律研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021.

[18] SPANGLER M G. Long-time measurement of loads on three pipe culverts[C]//52nd Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington, DC, USA. Highway Research Board, 1973: 1-14.

[19] LI S,HAN G Q,HO I H,et al. Coupled effect of cross-sectional shape and load reduction on high-filled cut-and-cover tunnels considering soil – structure interaction[J]. International journal of geomechanics,2020,20(7):04020082.

[20] 张豫川,高飞,吕国顺,等. 基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J]. 科学技术与工程,2018,18(30):220-227.
ZHANG Yuchuan,GAO Fei,LÜ Guoshun,et al. Numerical simulation of high fill foundation settlement based on creep test of loess[J]. Science technology and engineering,2018,18(30):220-227(in Chinese).

[21] 毕宗琦,宫全美,周顺华,等. 高速铁路桩承式路基土拱安定性分析[J]. 铁道学报,2016,38(11):102-110.
BI Zongqi, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, et al. Shakedown analysis of soil arch in piled embankment of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society,2016,38(11):102-110(in Chinese).

[22] 杨涛,王刚刚,闫业强,等. 桩承式路堤中土拱形态与成拱过程中土拱效应研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(4):731-735.
YANG Tao,WANG Ganggang,YAN Yeqiang,et al. Shape of soil arching and development of its effect in a piled Embankment[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2014,36(4):731-735(in Chinese).

（编辑　张璐）